

(19) 日本国特許庁 (J P)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-63968

(43) 公開日 平成9年(1997)3月7日

(51) Int.Cl. <sup>6</sup>	識別記号	序内整理番号	F I	技術表示箇所
H 01 L 21/205			H 01 L 21/205	
21/20			21/20	
21/265			21/265	Q
29/78	9055-4M		29/78	6 5 2 B
21/336	9055-4M			6 5 2 T

審査請求 未請求 請求項の数 9 ○ L (全 15 頁) 最終頁に続く

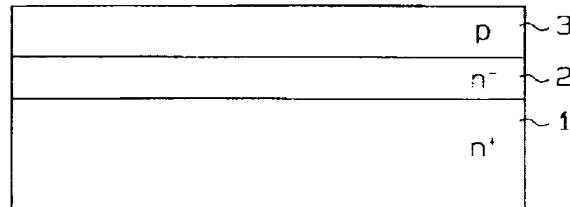
(21) 出願番号	特願平7-219255	(71) 出願人 000004260 株式会社デンソー 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地
(22) 出願日	平成7年(1995)8月28日	(71) 出願人 000003609 株式会社豊田中央研究所 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番 地の1
		(72) 発明者 宮嶋 健 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 日本電 装 株式会社内
		(74) 代理人 弁理士 恩田 博宣
		最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 p型炭化珪素半導体及びその製造方法

## (57) 【要約】

【課題】 ホウ素をトーピングした炭化珪素半導体においてキャリア濃度、活性化率を高くする。

【解決手段】 炭素と珪素とを含んだガスを流すと同時にホウ素を含んだガスを流すことによりn-型炭化珪素半導体層2の上にp型炭化珪素半導体層3を気相成長する際に、結晶成長に寄与する炭素の供給量Q<sub>c</sub>と、結晶成長に寄与する珪素の供給量Q<sub>Si</sub>との間に、1 < Q<sub>c</sub> / Q<sub>Si</sub> < 5の関係を満たしている。形成されたp型炭化珪素半導体層3においては、成分元素である炭素の原子密度d<sub>c</sub>と珪素の原子密度d<sub>Si</sub>との間に、1 < d<sub>c</sub> / d<sub>Si</sub> < 3.2 / 3.1の関係があり、浅いアクセプタレベルをもつ高キャリア濃度、高キャリア活性化率となっている。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 アクセプタ不純物としてホウ素をドーピングした単結晶炭化珪素半導体において成分元素である炭素の原子密度 $d_c$ と珪素の原子密度 $d_{Si}$ との間に、 $1 < d_c / d_{Si} \leq 3.2 / 3.1$ の関係があることを特徴とするp型炭化珪素半導体。

【請求項2】 硅素が存在すべき結晶格子位置の一部が空孔であることを特徴とする請求項1に記載のp型炭化珪素半導体。

【請求項3】 硅素が存在すべき結晶格子位置の一部が炭素であることを特徴とする請求項1に記載のp型炭化珪素半導体。

【請求項4】 硅素の原子密度 $d_{Si}$ と、珪素の原子密度 $d_{Si}$ と、ホウ素の原子密度 $d_B$ との間に、 $(d_{Si} - d_B) \geq d_{Si}$ の関係があることを特徴とする請求項1～3いずれか1項に記載のp型炭化珪素半導体。

【請求項5】 炭素と珪素とを含んだガスを流すと同時にホウ素を含んだガスを流すことにより単結晶炭化珪素基板の上にp型の単結晶炭化珪素半導体を気相成長する際に、結晶成長に寄与する炭素の供給量 $Q_c$ と、結晶成長に寄与する珪素の供給量 $Q_{Si}$ との間に、 $1 < Q_c / Q_{Si} \leq 5$ の関係を満足させることにより、成分元素である炭素の原子密度 $d_c$ と珪素の原子密度 $d_{Si}$ との間に $1 < d_c / d_{Si} \leq 3.2 / 3.1$ の関係を満足させるようにしたことを特徴とするp型炭化珪素半導体の製造方法。

【請求項6】 アクセプタ不純物としてホウ素を同時にドーピングした単結晶炭化珪素半導体を形成した後に、炭素をイオン注入する炭素原子增量工程を附加したことを特徴とするp型炭化珪素半導体の製造方法。

【請求項7】 単結晶炭化珪素半導体にアクセプタ不純物としてホウ素をイオン注入してp型の単結晶炭化珪素半導体を形成する際に、炭素をイオン注入する炭素原子增量工程を附加したことを特徴とするp型炭化珪素半導体の製造方法。

【請求項8】 イオン注入により添加された炭素の原子密度 $d_c$ と、既にあったか又はイオン注入により添加されたホウ素の原子密度 $d_B$ との間に、 $d_c \geq d_B$ の関係を満足させるようにイオン注入を行うことを特徴とする請求項6または7に記載のp型炭化珪素半導体の製造方法。

【請求項9】 イオン注入する炭素の深さ方向の原子密度分布と、ホウ素の深さ方向における原子密度分布とが略同じになるようにイオン注入条件を制御するようにした請求項6～8いずれか1項に記載のp型炭化珪素半導体の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【(0001)】

【発明の属する技術分野】この発明は、ホウ素をドーピングしたp型炭化珪素半導体及びその製造方法に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】従来、p型炭化珪素半導体を作製するために、アクセプタ不純物としてIII族元素のホウ素の導入が試みられている。つまり、結晶成長時にホウ素を添加したりイオン注入で結晶表面からホウ素を添加してホウ素をアクセプタとしたp型単結晶炭化珪素を形成することが行われている。

## 【0003】

【発明が解決しようとする課題】ところが、ホウ素をドーピングして高キャリア濃度、高活性化率のp型炭化珪素は得られていなかった（例えば、M. V. Rao et al. : Journal of Applied Physics Volume 77 No. 6 (1995) p. 2479）。この原因として、炭化珪素中にドーピングされたホウ素のアクセプタレベルは充満帯レベルを基準として735 meVと深いレベルにあること（S. G. Bishop et al. : Amorphous and Crystalline Silicon Carbide edited by G. L. Harris et al., Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1989) p. 90）。また、炭化珪素中にドーピングされたホウ素の位置は、ドーピングされない場合には炭素原子が本来その位置を占める、いわゆる炭素サイトであること（J. A. Freitas et al. : Amorphous and Crystalline Silicon Carbide II edited by G. L. Harris et al., Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1992) p. 135）などがその原因の一つとして報告されている。

【0004】そして、ホウ素をドーピングしたp型炭化珪素中のキャリア濃度の制御やその方法について、未だ明らかにされていなかった。そこで、この発明の目的は、ホウ素をドーピングした炭化珪素半導体においてキャリア濃度、活性化率を高くするための構造とその製造方法を提供することにある。

## 【0005】

【課題を解決するための手段】請求項1に記載の発明は、アクセプタ不純物としてホウ素をドーピングした単結晶炭化珪素半導体において、成分元素である炭素の原子密度 $d_c$ と珪素の原子密度 $d_{Si}$ との間に、 $1 < d_c / d_{Si} \leq 3.2 / 3.1$ の関係があるp型炭化珪素半導体をその要旨とする。

【0006】請求項2に記載の発明は、請求項1に記載の発明において、珪素が存在すべき結晶格子位置の一部が空孔であるp型炭化珪素半導体をその要旨とする。請求項3に記載の発明は、請求項1に記載の発明において、珪素が存在すべき結晶格子位置の一部が炭素であるp型炭化珪素半導体をその要旨とする。

【0007】請求項4に記載の発明は、請求項1～3のいずれか1項に記載の発明において、炭素の原子密度 $d_c$ と、珪素の原子密度 $d_{Si}$ と、ホウ素の原子密度 $d_B$ との間に、 $(d_c - d_B) \geq d_{Si}$ の関係があるp型炭化珪素半導体をその要旨とする。

【0008】請求項うに記載の発明は、炭素と珪素とを含んだガスを流すと同時にホウ素を含んだガスを流すことにより単結晶炭化珪素基板の上にp型の単結晶炭化珪素半導体を気相成長する際に、結晶成長に寄与する炭素の供給量Q<sub>1</sub>と、結晶成長に寄与する珪素の供給量Q<sub>2</sub>との間に、 $1 < Q_1 / Q_2 < 1$ の関係を満足させることにより、成分元素である炭素の原子密度d<sub>1</sub>と珪素の原子密度d<sub>2</sub>との間に $1 < d_1 / d_2 < 3.2 / 3.1$ の関係を満足させるようにしたp型炭化珪素半導体の製造方法をその要旨とする。

【0009】請求項うに記載の発明は、アクセプタ不純物としてホウ素を同時にドーピングした単結晶炭化珪素半導体を形成した後に、炭素をイオン注入する炭素原子増量工程を付加したp型炭化珪素半導体の製造方法をその要旨とする。

【0010】請求項7に記載の発明は、単結晶炭化珪素半導体にアクセプタ不純物としてホウ素をイオン注入してp型の単結晶炭化珪素半導体を形成する際に、炭素をイオン注入する炭素原子増量工程を付加したp型炭化珪素半導体の製造方法をその要旨とする。

【0011】請求項8に記載の発明は、請求項6または7に記載の発明において、イオン注入により添加された炭素の原子密度d<sub>1</sub>と、既にあったか又はイオン注入により添加されたホウ素の原子密度d<sub>2</sub>との間に $d_1 \geq d_2 / 3.2 / 3.1$ の関係を満足させるようにイオン注入を行うp型炭化珪素半導体の製造方法をその要旨とする。

【0012】請求項9に記載の発明は、請求項6～8のいずれか1項に記載の発明において、イオン注入する炭素における深さ方向の原子密度分布と、ホウ素における深さ方向の原子密度分布とが略同じになるようにイオン注入条件を制御するようにしたp型炭化珪素半導体の製造方法をその要旨とする。

(作用)請求項1に記載の発明によれば、 $1 < d_1 / d_2 < 3.2 / 3.1$ の関係を満足させることにより、単位体積当たりの炭素の原子数が珪素の原子数より多くなり、炭素リッチとなる。その結果、ホウ素を珪素位置に存在させることができる。よって、単位体積当たりの珪素の原子数が炭素の原子数より多い珪素リッチである場合に比べ、アクセプタレベルが浅くなり、キャリア濃度、活性化率が高くなる。

【0013】請求項2に記載の発明によれば、請求項1に記載の発明の作用に加え、珪素が存在すべき結晶格子位置の一部を空孔として、炭素リッチとなる。その結果、ホウ素を珪素位置に存在させることができる。よって、単位体積当たりの珪素の原子数が炭素の原子数より多い珪素リッチである場合に比べ、アクセプタレベルが浅くなり、キャリア濃度、活性化率が高くなる。

【0014】請求項3に記載の発明によれば、請求項1に記載の発明の作用に加え、珪素が存在すべき結晶格子位置の一部を炭素として炭素リッチとなる。その

結果、ホウ素を珪素位置に存在させることができる。よって、単位体積当たりの珪素の原子数が炭素の原子数より多い珪素リッチである場合に比べ、アクセプタレベルが浅くなり、キャリア濃度、活性化率が高くなる。

【0015】請求項4に記載の発明によれば、請求項1～3のいずれか1項に記載の発明の作用に加え、 $(d_1 - d_2) / d_2 \geq d_1$ の関係を満足させることにより、炭素リッチとなる。その結果、ホウ素を珪素位置に存在させることができる。よって、単位体積当たりの珪素の原子数が炭素の原子数より多い珪素リッチである場合に比べ、アクセプタレベルが浅くなり、キャリア濃度、活性化率が高くなる。

【0016】請求項5に記載の発明によれば、p型の単結晶炭化珪素半導体を気相成長する際に、 $1 < Q_1 / Q_2 < 5$ の関係を満足させることにより、成分元素である炭素の原子密度d<sub>1</sub>と珪素の原子密度d<sub>2</sub>との間に $1 < d_1 / d_2 < 3.2 / 3.1$ の関係を満足させて、形成された炭化珪素半導体において炭素原子が増量され、ホウ素を珪素位置に存在させることができる。よって、ホウ素の活性化率を決定するアクセプタレベルが浅くなる。その結果、高キャリア濃度、高活性化率のp型炭化珪素半導体が得られる。

【0017】請求項6に記載の発明によれば、ホウ素を同時にドーピングした単結晶炭化珪素半導体を形成した後に、炭素をイオン注入して炭素原子の増量が行われる。このように炭素原子を増量することにより、ホウ素を珪素位置に存在させることができる。よって、ホウ素の活性化率を決定するアクセプタレベルが浅くなる。その結果、高キャリア濃度、高活性化率のp型炭化珪素半導体が得られる。

【0018】請求項7に記載の発明によれば、単結晶炭化珪素半導体にホウ素をイオン注入してp型の単結晶炭化珪素半導体を形成する際に、炭素がイオン注入され炭素原子の増量が行われる。つまり、単結晶炭化珪素半導体に対しホウ素をイオン注入してから炭素をイオン注入するか、あるいは、炭素をイオン注入してからホウ素をイオン注入することにより、炭素原子の増量が行われる。

【0019】このように炭素原子を増量することにより、ホウ素を珪素位置に存在させることができる。よって、ホウ素の活性化率を決定するアクセプタレベルが浅くなる。その結果、高キャリア濃度、高活性化率のp型炭化珪素半導体が得られる。

【0020】又、気相成長法に比べ所望の領域に選択的にp型炭化珪素半導体を形成できる。請求項8に記載の発明によれば、請求項6または7に記載の発明の作用に加え、イオン注入により添加された炭素の原子密度d<sub>1</sub>と、既にあったか又はイオン注入により添加されたホウ素の原子密度d<sub>2</sub>との間において $d_1 \geq d_2$ の関係を満足させるようにイオン注入が行われ、請求項4に記載の

5  
p型炭化珪素半導体が製造される。

【0021】請求項9に記載の発明によれば、請求項6～8のいずれか1項に記載の発明の作用に加え、イオン注入条件の制約により、イオン注入する炭素の深さ方向の原子密度分布と、ホウ素の深さ方向における原子密度分布とか略同じになる。よって、深さ方向においてホウ素の原子密度と炭素の原子密度とをコントロールして所望のキャリア密度分布が得られる。

【0022】

【発明の実施の形態】

(第1の実施の形態) 以下、この発明の第1の実施の形態を図面に従って説明する。

【0023】本形態では、エピタキシャル基板に具体化している。以下、図1～図3を用いて説明する。図1に示すように、n<sup>-</sup>型単結晶炭化珪素半導体基板1を用意する。そして、図2に示すように、CVD法にてn<sup>-</sup>型単結晶炭化珪素半導体基板1の表面上にn<sup>-</sup>型炭化珪素半導体層2をエピタキシャル成長する。さらに、図3に示すように、S<sub>1</sub>H<sub>1</sub>ガスとC<sub>1</sub>H<sub>1</sub>ガスとB<sub>1</sub>H<sub>1</sub>ガスとを原料ガスとして用いたCVD法によりn<sup>-</sup>型炭化珪素半導体層2上にホウ素をドーピングしたp型炭化珪素半導体層3をエピタキシャル成長してダブルエピタキシャル単結晶炭化珪素半導体基板を作製する。ここで、供給原料ガス(S<sub>1</sub>H<sub>1</sub>ガス、C<sub>1</sub>H<sub>1</sub>ガス)中において結晶成長に寄与する炭素の供給量Q<sub>c</sub>と、結晶成長に寄与する珪素の供給量Q<sub>Si</sub>との間に、1 < Q<sub>c</sub> / Q<sub>Si</sub> < 5の関係を満たすようにする。即ち、炭素の量Q<sub>c</sub>を珪素の量Q<sub>Si</sub>より多くするとともに(Q<sub>c</sub> / Q<sub>Si</sub> > 1)、炭化珪素が形成可能な範囲内(Q<sub>c</sub> / Q<sub>Si</sub> < 5)にする。

【0024】尚、供給原料ガスであるS<sub>1</sub>H<sub>1</sub>ガスの代わりにS<sub>1</sub>H<sub>1</sub>ガスを用いたり、C<sub>1</sub>H<sub>1</sub>ガスの代わりにC<sub>1</sub>H<sub>1</sub>ガスやC<sub>1</sub>H<sub>1</sub>ガスやC<sub>1</sub>H<sub>1</sub>ガスを用いてもよい。

【0025】このように製造されたp型炭化珪素半導体層3においては、炭素の原子密度d<sub>c</sub>と珪素の原子密度d<sub>Si</sub>との間に1 < d<sub>c</sub> / d<sub>Si</sub> < 3.2 / 3.1の関係を満足\*

\*しており、ホウ素は珪素位置に存在し、珪素リッチである場合に比べ浅いアクセプタレベルをもつ高キャリア濃度、高キャリア活性化率のp型炭化珪素となっている。さらに、炭素リッチな状態として、(イ)結晶格子間に炭素が存在する状態、(ロ)珪素が存在すべき結晶格子位置が空孔の状態、(ハ)珪素が存在すべき結晶格子位置に炭素を配置した状態、(ニ)珪素が存在すべき結晶格子位置にホウ素を配置した状態が考えられるが、本構成では、珪素が存在すべき結晶格子位置の一部にホウ素が配置されているか、珪素が存在すべき結晶格子位置の一部が空孔であるか、あるいは、珪素が存在すべき結晶格子位置の一部に炭素が配置されている。さらに、炭素の原子密度d<sub>c</sub>と、珪素の原子密度d<sub>Si</sub>と、ホウ素の原子密度d<sub>B</sub>との間に、(d<sub>c</sub> + d<sub>Si</sub>) > d<sub>B</sub>の関係が成立している。ここで、d<sub>c</sub> - d<sub>Si</sub> = d<sub>B</sub>とは、炭素とホウ素とを100%置換するための最低条件を示している。

【0026】以下、その論理的な説明を行う。炭化珪素半導体にドーピングされたホウ素の活性化率を決定するアクセプタレベルは、結晶内における不純物元素の位置(珪素サイト(トーピングされない場合には本来珪素原子が占める位置)または炭素サイト(同じく本来炭素原子が占める位置))によって異なると考えられる。

【0027】本発明者らは、実験値や経験定数を参照しない第一原理計算(例えば、日本物理学会誌第48巻第6号(1993年)p425)を利用した数値解析手法により、64原子から成る炭化珪素結晶モデルを作り、炭化珪素半導体の珪素サイトまたは炭素サイトにホウ素原子が1個だけ存在する場合のアクセプタレベル、結晶内の電子状態、生成エネルギーを計算した。

【0028】最初に、炭化珪素半導体中のアクセプタ不純物としてのホウ素の、エネルギーバンド図における禁止帯中の不純物レベルについて調べた。計算結果を表1に示す。

【0029】

【表1】

	珪素サイト	炭素サイト
アクセプタレベル	10 meV	260 meV

【0030】表1より、ホウ素原子が1個だけ珪素サイトに配置した64原子結晶モデルの場合、炭素サイトに比べ浅いアクセプタレベルが得られることか分かった。図3.0にホウ素原子を1個だけ珪素サイトに配置した場合の(110)面上のアクセプタの波動関数の2乗の等高線を示す。この計算モデルの模式図を図3.1に示す。波動関数は64原子結晶モデルの全域に広がっている。図3.2にホウ素原子を1個だけ炭素サイトに配置した場

合の(110)面上のアクセプタの波動関数の2乗の等高線を示す。波動関数は64原子結晶モデルの全域に広がっているが、ホウ素を珪素サイトに配置した場合の方が炭素サイトに配置した場合より電子の局在性が弱く、浅いレベルのアクセプタを形成することが波動関数の広がりからも分かった。

【0031】このようにホウ素を珪素サイトに配置することで浅いアクセプタレベルが得られることが本解析に

より明らかになつたので、次にホウ素が珪素サイトまたは炭素サイトのいずれに安定に存在しうるかについて生成エネルギーを計算して解析した。

【0032】解析には、次に述べる二つの手法を用いた。まず、64原子結晶モデルの珪素サイトにホウ素原子

$$E_r = E(n_{Si}, n_c, n_b) - n_{Si} \mu_{Si} - n_c \mu_c - n_b \mu_b \quad \cdots (1)$$

と表わされる。ここで、 $E(n_{Si}, n_c, n_b)$  は64原子結晶モデルの全エネルギー、 $\mu_{Si}$ 、 $\mu_c$ 、 $\mu_b$  は、珪素、炭素、ホウ素の化学ボテンシャルである。 $n_{Si}$ 、 $n_c$ 、 $n_b$  は64原子結晶モデル中の珪素原子、炭素原子、ホウ素原子の数を表わす。

$$E_r(B_{Si}) - E_r(B_c) = E(31S_i, 32C, 1B) - E(32S_i, 31C, 1B) + \mu_{Si} - \mu_c \quad \cdots (2)$$

と表わされる。この値が正ならホウ素は炭素サイトに、負なら珪素サイトに存在する。炭化珪素の完全結晶の化学ボテンシャルを $\mu_{Si(bulk)}$  とすると、

$$\mu_{Si} + \mu_c - \mu_{Si(bulk)} \cdots (3)$$

\*子を1個だけ配置した場合、および炭素サイトにホウ素原子を1個だけ配置した場合について、化学ボテンシャルを用いて生成エネルギーを解析した。ここでは珪素サイトあるいは炭素サイトに配置したホウ素以外に欠陥が存在しないものとする。生成エネルギー $E_r$  は、

※【0033】ホウ素原子1個だけを珪素サイトあるいは炭素サイトに配置した場合を考えるため、ホウ素が珪素サイトに存在する場合の生成エネルギーを $E_r(B_{Si})$ 、ホウ素が炭素サイトに存在する場合の生成エネルギーを $E_r(B_c)$  とすると、生成エネルギーの差は

$$\mu_{Si(bulk)} - \mu_{Si(bulk)} + \Delta H_r \quad \cdots (4)$$

なる関係がある。

【0034】ここで、炭化珪素では $\Delta H_r = -0.7 eV$  である。(3)式～(4)式から

$$E_r(B_{Si}) - E_r(B_c) = -0.7 + 2\Delta\mu \quad (eV) \quad \cdots (5)$$

と表わされる。

【0035】化学ボテンシャル $\Delta\mu$ の取り得る範囲を検討する。 $\mu_c$  の最大値は $\mu_{Si(bulk)}$  に等しい条件であり、(5)式から $10$  である。又、 $\mu_{Si}$  の最小値は $\mu_c$  と $\mu_{Si(bulk)}$  が等しい場合であり、(3)、(4)、(5)式から $\mu_{Si(bulk)} + \Delta H_r$  に等しく、 $-0.7 eV$  である。従って、 $\Delta\mu$  の取り得る範囲は、

$$-0.7 \leq \Delta\mu < 0 \quad (eV) \quad \cdots (7)$$

である。

★さらに、炭化珪素、珪素、炭素(ダイヤモンド)それぞれの完全結晶の化学ボテンシャル $\mu_{Si(bulk)}$ 、 $\mu_{Si(bulk)}$ 、 $\mu_{C(bulk)}$  と炭化珪素の生成熱 $\Delta H_r$  との間には、

$$\star \mu_{Si} = \mu_{Si(bulk)} + \Delta\mu \quad \cdots (5)$$

を定義すると、(2)式は、(3)式、(4)式、(5)式から

$$\cdots (6)$$

◆【0036】前述したように、生成エネルギーの差( $E_r(B_{Si}) - E_r(B_c)$ )が正ならホウ素は炭素サイトに、負ならホウ素は珪素サイトに存在する方が安定である。炭素原子密度が珪素原子密度より大きい場合を炭素リッチ、小さい場合を珪素リッチとして、生成エネルギーの差( $E_r(B_{Si}) - E_r(B_c)$ )の計算結果を表2に示す。

【0037】

◆【表2】

	炭素リッチ	珪素リッチ
$\Delta\mu$	$-0.7$	$0.0$
$E_r(B_{Si}) - E_r(B_c)$	$-0.4 eV$	$1.0 eV$

【0038】炭素リッチモデルでは生成エネルギー差( $E_r(B_{Si}) - E_r(B_c)$ ) は負であり、ホウ素は珪素サイトに存在する方が安定であり、一方、珪素リッチモデルでは生成エネルギー差は正であり、炭素サイト

に存在する方が安定であることが分かった。

【0039】次に、ホウ素のドーピングに際して、64原子結晶モデルの珪素サイトにホウ素原子を1個だけ配置した場合、炭素サイトにホウ素原子を1個だけ配置し

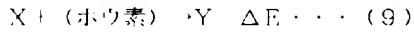
た場合について、ホウ素の存在以外の欠陥がある場合に\* \*について生成エネルギーを解析した。生成エネルギーは、

$$E_f = \frac{\{E(n_{Si}, n_c, n_s) - n_{Si}E_{Si}^* - n_cE_c^* - n_sE_s^*\}}{(E_p(32, 32, 0) - 32E_{Si}^* - 32E_c^*) (n_c + n_s) / 64} \quad \cdots (8)$$

ここで、 $E_{Si}^*$ 、 $E_c^*$ 、 $E_s^*$ は珪素、炭素、ホウ素の擬ボテンシャルを用いた場合の孤立原子のエネルギーである。

【0040】(8)式は欠陥があるモデルの場合と、64原子完全結晶モデルとの凝集エネルギーの差から生成エネルギーを定義することを意味する。欠陥に関し

(9)式のような反応が起きるとする。



$$\Delta E = E_f(Y) - E_f(X) \cdots \cdots (10)$$

(9)式において、 $\Delta E$ が小さいほど反応が起こりやすい。

【0041】珪素リッチのモデルについて検討する。珪

素リッチのモデルとして、結晶格子間に珪素が存在する場合、炭素サイトが空孔の場合、および珪素を炭素サイトに配置した場合を考えた。それぞれの生成エネルギーを64原子モデルで計算した結果、p型炭化珪素の場合は炭素サイトの一つが空孔である場合が、n型炭化珪素の場合は1つの珪素原子が炭素サイトに存在する場合が、エネルギー的にみた確率論において最もできやすい（安定している）。最もできやすいモデルについて、ホウ素原子を1個だけ珪素位置または炭素位置に配置した場合の反応式を表3に示す。

【0042】

【表3】

	反応式
珪素リッチ p型 ホウ素を珪素サイトに配置	$B \rightarrow B_{s1} + V_c^{2+} + 2.4 \text{ eV}$
珪素リッチ p型 ホウ素を炭素サイトに配置	$V_c^{2+} + B \rightarrow B_c + 2.0 \text{ eV}$
珪素リッチ n型 ホウ素を珪素サイトに配置	$B \rightarrow B_{s1}^- + 1/2 Si_c + 4.5 \text{ eV}$
珪素リッチ n型 ホウ素を炭素サイトに配置	$1/2 C_{s1} + B \rightarrow B_c^- + 0.3 \text{ eV}$

$B_{s1}$  : 硅素が存在すべき結晶格子位置に存在するホウ素

$B_{s1}^-$  : 硅素が存在すべき結晶格子位置に存在する-1価のホウ素

$B_c$  : 炭素が存在すべき結晶格子位置に存在するホウ素

$B_c^-$  : 炭素が存在すべき結晶格子位置に存在する-1価のホウ素

$V_c^{2+}$  : 炭素が存在すべき結晶格子位置に存在する+2価の空孔

$Si_c$  : 炭素が存在すべき結晶格子位置に存在する硅素

$C_{s1}$  : 硅素が存在すべき結晶格子位置に存在する炭素

【0043】珪素リッチモデルでは、n型炭化珪素、p型炭化珪素共に、ホウ素を炭素サイトに配置した場合が△下か小さく、炭化珪素の導電型によらずホウ素は炭素サイトで安定であることが分かった。又、珪素リッチのp型炭化珪素の炭素サイトの1つが空孔であるモデルは、浅いトナー・レヘルを発生させ、ドーピングされたアクセプタ不純物としてのホウ素の機能が阻害されるため、炭素サイトの空孔は存在させないのがよいことが分かった。

【0044】炭素リッチのモデルについて検討する。炭

素リッチのモデルとして、結晶格子間に炭素が存在する場合、珪素サイトが空孔の場合、および炭素を珪素サイトに配置した場合を考えた。それぞれの生成エネルギーを6.4原子モデルで計算した結果、炭化珪素の導電型によらず、1つの炭素原子が珪素サイトに存在する場合が最もできやすい。最もできやすいモデルについて、ホウ素原子を1個だけ珪素位置または炭素位置に配置した場合の反応式を表4に示す。

【0045】

【表4】

反応式	
炭素リッチ ホウ素を珪素サイトに配置	$1/2 \text{Cs}_i + B \rightarrow B_{si} + 0, 5 \text{eV}$
炭素リッチ ホウ素を炭素サイトに配置	$B \rightarrow B_c + 1/2 \text{Cs}_i + 3, 9 \text{eV}$

【0046】炭素リッチモデルでは、ホウ素を珪素サイトに配置した場合が△上が小さく、炭化珪素の導電性によらずホウ素は珪素サイトで安定であることか分かった。又、1個の珪素サイトに炭素原子を配置した6.4原子モデルにおいては、元素の周規律表でIV族である珪素の代わりに同じIV族の炭素を存在するため、新たなレベルを発生せず、トーピングされたアクセプタ不純物としてのホウ素の機能が阻害されないことが分かった。

【0047】以上述べたとおり、炭素リッチな炭化珪素半導体にトーピングされたホウ素は、珪素サイトに配置したモデルが安定であり、浅いアクセプタ不純物レベルを実現できる。又、珪素リッチのp型炭化珪素の炭素サイトの1つが空孔であるモデルは、浅いドナーレベルを発生させ、トーピングされたアクセプタ不純物としてのホウ素の機能が阻害されるため炭素サイトの空孔が無い方が、ホウ素がアクセプタ不純物として有効に働く。

【0048】以上詳述したように本実施の形態では、結晶成長に寄与する炭素を、結晶成長に寄与する珪素よりも多く供給してp型の単結晶炭化珪素半導体(3)を気相成長させることにより、成分元素である炭素の原子密度 $d_c$ と珪素の原子密度 $d_s$ との間に $1 < d_c/d_s \leq 3.2$ の関係を満足させるようにしたので、形成された単結晶炭化珪素半導体において炭素原子が増量され、ホウ素を珪素位置に存在させることができる。よって、ホウ素の活性化率を決定するアクセプタレベルが浅くなる。その結果、高キャリア濃度、高活性化率のp型炭化珪素半導体が得られる。

【0049】本実施の形態における応用例として、図1～3では、p/n/p構造のエピタキシャル基板の作製を例にとって説明したが、図4、5、6に示すようにn/p/p構造であってもよい。

【0050】つまり、図4に示すようにp型単結晶炭化珪素半導体基板4を用意し、図5に示すように、その表面にp型炭化珪素半導体層5をCVD法にてエピタキシャル成長する。さらに、図6に示すように、CVD法によりp型炭化珪素半導体層6をn型炭化珪素半導体層6をエピタキシャル成長してダブルエピタキシ

ヤル単結晶炭化珪素基板を作製する。この場合のp型炭化珪素半導体層5の形成時に前述したように供給原料ガス(SiH<sub>4</sub>ガス、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>ガス)中における結晶成長に寄与する炭素の量 $Q_c$ と結晶成長に寄与する珪素の量 $Q_{s1}$ とを、 $1 < Q_c/Q_{s1} \leq 5$ の条件を満たすようにしててもよい。

【0051】又、他の応用例としては、図7に示すように、p型単結晶炭化珪素半導体基板7を用意し、図8に示すように、その表面にp型炭化珪素半導体層8をCVD法にてエピタキシャル成長する場合において、p型炭化珪素半導体層8の成長時に、前述したように供給原料ガス(SiH<sub>4</sub>ガス、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>ガス)中における結晶成長に寄与する炭素の量 $Q_c$ と結晶成長に寄与する珪素の量 $Q_{s1}$ とを、 $1 < Q_c/Q_{s1} \leq 5$ の条件を満たすようにしててもよい。

(第2の実施の形態) 次に、この発明の第2の実施の形態を図面に従って説明する。

【0052】本実施の形態では、nチャネル型SiC-MOSFETに具体化している。以下、図9～図18を用いて説明する。このMOSFETにおいては、図18に示すように、低抵抗p型炭化珪素層15を介してソース電極19とp型炭化珪素半導体層13とのコンタクトがとられている。

【0053】まず、図9に示すように、n型単結晶炭化珪素半導体基板11を用意し、その表面にn型炭化珪素半導体層12をCVD法にてエピタキシャル成長し、さらに、n型炭化珪素半導体層12上に、p型炭化珪素半導体層13をCVD法によりエピタキシャル成長する。その結果、炭化珪素半導体基板21が形成される。

【0054】そして、図10に示すように、炭化珪素半導体基板21の表面にマスク材22を配置し、この状態で基板21の所定領域に空素をイオン注入してn型ソース領域14を形成する。そして、図11に示すように、例えば珪素酸化膜をマスク材23として用いてp型炭化珪素半導体層13の所定領域に炭素をイオン注入する。続いて、図12に示すように、同じマスク材23を

用いてホウ素をイオン注入する。この際、図19に示すように、イオン注入された炭素の原子密度 $d_c$ と、イオン注入されたホウ素の原子密度 $d_{B4}$ との間に、 $d_c \geq d_{B4}$ の関係があるように炭素とホウ素のイオン注入を行うよい。又、イオン注入する炭素の深さ方向における原子密度分布は、ホウ素の深さ方向における原子密度分布と略同じにするよりよい。より具体的には、イオン注入の際の加熱電圧や注入量を調整することにより原子密度分布をコントロールすることができる。又、炭素とホウ素の注入順序はどちらが先でもよい。

【0055】この後、図13に示すようにマスク材23を除去するとともに、結晶性の回復とホウ素の活性化を目的とした熱処理を実施する。このようにして、 $n'$ 型ソース領域14の周囲に低抵抗 $p$ 型炭化珪素領域15が形成される。

【0056】さらに、図14に示すように、ソース領域14及び $p$ 型炭化珪素半導体層13と共に貫通して $n$ 型炭化珪素半導体層12に達する溝16を形成する。そして、図15に示すように、溝16の内部を含む基板上にケート酸化膜となる酸化膜17aを配置し、図16に示すように、溝16の内部における酸化膜17aの上にケート電極18を配置する。さらに、図17に示すように、ケート電極18の上および酸化膜17aの上に酸化膜17bを配置する。

【0057】その後、図18に示すように、溝16の周辺部の酸化膜17a、17bを残して他の酸化膜17a、17bを除去するとともに、基板上にソース電極19を形成する。その結果、ソース領域14と低抵抗 $p$ 型炭化珪素領域15にはそれぞれソース電極19が接触する。尚、ソース領域14と低抵抗 $p$ 型炭化珪素領域15の電極は、別々の材料でもよい。又、 $n'$ 型単結晶炭化珪素半導体基板11の裏面には、トレンイン電極20を形成する。

【0058】このようにして $p$ チャネル縦型 $S + C + M$ の $S + T$ が製造される。このように本実施の形態では、単結晶炭化珪素半導体(13)にホウ素をイオン注入して $p$ 型の単結晶炭化珪素半導体(15)を形成する際に、炭素をイオン注入して炭素原子の増量を行うようにした。即ち、単結晶炭化珪素半導体(13)に対しホウ素をイオン注入してから炭素をイオン注入するか、あるいは、炭素をイオン注入してからホウ素をイオン注入することにより、炭素原子の増量が行われる。このように炭素原子を増量することにより、ホウ素を珪素位置に存在させることができ。よって、ホウ素の活性化率を決定するアクセプタレベルが浅くなる。その結果、高キャリア濃度、高活性化率の $p$ 型炭化珪素半導体が得られる。

【0059】又、イオン注入法を用いているので気相成長法に比べて所望の領域に選択的に $p$ 型炭化珪素半導体を形成できる。さらに、図19に示すように、イオン注入

により添加された炭素の原子密度 $d_c$ と、既にあったか又はイオン注入により添加されたホウ素の原子密度 $d_{B4}$ との間に、 $d_c \geq d_{B4}$ の関係を満足させるように炭素とホウ素のイオン注入を行ったので、炭素の原子密度 $d_c$ と珪素の原子密度 $d_{Si}$ とホウ素の原子密度 $d_{B4}$ との間ににおいて、 $(d_c - d_{Si}) \geq d_{B4}$ を満足させることができ。

【0060】さらには、図19に示すように、イオン注入条件の制御により、イオン注入する炭素の深さ方向の原子密度分布と、ホウ素の深さ方向における原子密度分布とを略同じにした。よって、深さ方向においてホウ素の原子密度と炭素の原子密度とをコントロールして所望のキャリア密度分布を得ることができる。

【0061】上述した例では、イオン注入にてホウ素をドーピングされた単結晶炭化珪素半導体(13)を形成した後に、炭素をイオン注入して炭素原子の増量を行う場合について説明したが、気相成長にてホウ素をドーピングされた単結晶炭化珪素を形成した後に、炭素をイオン注入して炭素原子の増量を行うようにしてもよい。つまり、アクセプタ不純物としてホウ素を同時ドーピングした単結晶炭化珪素半導体を形成した後に、炭素をイオン注入する炭素原子増量工程を付加することにより、炭素原子の増量を行う。このように炭素原子を増量することにより、ホウ素を珪素位置に存在させることができ。よって、ホウ素の活性化率を決定するアクセプタレベルが浅くなる。その結果、高キャリア濃度、高活性化率の $p$ 型炭化珪素半導体が得られる。この場合の、ホウ素を同時ドーピングした単結晶炭化珪素半導体を形成するとは、気相成長により単結晶炭化珪素半導体を形成するプロセスの他にも、昇華再結晶法により単結晶炭化珪素半導体を形成するプロセスを含むものである。

【0062】この気相成長にて形成された単結晶炭化珪素半導体に対し炭素のイオン注入を行う場合において、イオン注入により添加された炭素の原子密度 $d_c$ と、既にあったホウ素の原子密度 $d_{B4}$ との間に、 $d_c \geq d_{B4}$ の関係を満足させるように炭素のイオン注入を行うことにより、炭素の原子密度 $d_c$ と、珪素の原子密度 $d_{Si}$ と、ホウ素の原子密度 $d_{B4}$ との間に、 $(d_c - d_{Si}) \geq d_{B4}$ の関係を満足する単結晶炭化珪素半導体を形成することができる。

【0063】これまでの説明においては $p$ チャネル縦型 $S + C + MOSFET$ 製造に適用した場合を示したが、図20～29に示すように、 $p$ チャネル縦型 $S + C + MOSFET$ の製造プロセスにも適用できる。

【0064】まず、図20に示すように、 $p$ 型単結晶炭化珪素半導体基板24の表面に $p$ 型炭化珪素半導体層25をCVD法にてエピタキシャル成長し、さらにその上に $n$ 型炭化珪素半導体層26をCVD法によりエピタキシャル成長する。そして、図21に示すように、マスク材27を用いて $n$ 型炭化珪素半導体層26の所定領

域に炭素をイオン注入するとともに、図22に示すように同じマスク材27を用いてホウ素をイオン注入する。この際、図19に示したように、イオン注入された炭素の原子密度と、イオン注入されたホウ素の原子密度は、との間に比例の関係があり、かつ、両原子の原子密度分布を略同じにする。このようにして、p型ソース領域28が形成され、この際の炭素とホウ素をイオン注入するプロセスにおいて前述した効果が得られる。

【0065】そして、図23に示すように、マスク材29を用いて、p型炭化珪素半導体層26の所定領域に窒素をイオン注入して、p型ソース領域28の周間に低抵抗n型炭化珪素領域30を形成する。さらに、図24に示すように、マスク材29を除去した後、図25に示すように、マスク材29を除去した後、図25に示すように、ソース領域28及びn型炭化珪素半導体層26と共に貫通してp型炭化珪素半導体層25に達する溝31を形成する。そして、図26に示すように、溝31の内部を含む基板上にゲート酸化膜となる酸化膜32aを配置し、図27に示すように、溝31の内部における酸化膜32aの上にゲート電極33を配置する。さらに、図28に示すように、ゲート電極33の上および酸化膜32aの上に酸化膜32bを配置する。

【0066】その後、図29に示すように、溝31の周辺部の酸化膜32a、32bを残して他の酸化膜32a、32bを除去するとともに、基板上にソース電極34を形成する。又、p型単結晶炭化珪素半導体基板24の裏面にドレイン電極35を形成して、pチャネル縦型SiC・MOSFETの製造が完了する。

【0067】

【発明の効果】以上詳述したように、請求項1、2、3、4に記載の発明によれば、ホウ素をドーピングした炭化珪素半導体においてキャリア濃度、活性化率を高くすることができる優れた効果を發揮する。

【0068】請求項5、6、7、8に記載の発明によれば、高キャリア濃度、高キャリア活性化率のp型炭化珪素半導体を製造することができる。特に、請求項7に記載の発明においては、所望の領域に選択的にp型炭化珪素半導体を形成することができる。

【0069】請求項9に記載の発明によれば、請求項6～8のいずれか1項に記載の発明の効果に加え、深さ方向においてホウ素の原子密度と炭素の原子密度とをコントロールして所望のキャリア密度分布を得ることができます。

【図面の簡単な説明】

【図1】第1の実施の形態におけるエピタキシャル基板の製造工程を示す断面図。

【図2】第1の実施の形態におけるエピタキシャル基板の製造工程を示す断面図。

【図3】第1の実施の形態におけるエピタキシャル基板の製造工程を示す断面図。

【図4】第1の実施の形態の応用例におけるエピタキシャル基板の製造工程を示す断面図。

【図5】第1の実施の形態の応用例におけるエピタキシャル基板の製造工程を示す断面図。

【図6】第1の実施の形態の応用例におけるエピタキシャル基板の製造工程を示す断面図。

【図7】第1の実施の形態の他の応用例におけるエピタキシャル基板の製造工程を示す断面図。

【図8】第1の実施の形態の他の応用例におけるエピタキシャル基板の製造工程を示す断面図。

【図9】第2の実施の形態におけるnチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図10】第2の実施の形態におけるnチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図11】第2の実施の形態におけるnチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図12】第2の実施の形態におけるnチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図13】第2の実施の形態におけるnチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図14】第2の実施の形態におけるnチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図15】第2の実施の形態におけるnチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図16】第2の実施の形態におけるnチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図17】第2の実施の形態におけるnチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図18】第2の実施の形態におけるnチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図19】イオン注入された炭素の原子密度の深さ分布とイオン注入されたホウ素の原子密度の深さ分布図。

【図20】第2の実施の形態の応用例におけるpチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図21】第2の実施の形態の応用例におけるpチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図22】第2の実施の形態の応用例におけるpチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図23】第2の実施の形態の応用例におけるpチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図24】第2の実施の形態の応用例におけるpチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図25】第2の実施の形態の応用例におけるpチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図26】第2の実施の形態の応用例におけるpチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図27】第2の実施の形態の応用例におけるpチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図28】第2の実施の形態の応用例におけるpチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図29】第2の実施の形態の応用例におけるpチャネル縦型SiC・MOSFETの製造工程を示す断面図。

【図30】ホウ素原子を1個だけ珪素サイトに配置した場合の(110)面上のアクセプタの波動関数の2乗の等高線。

【図31】ホウ素原子を1個だけ珪素サイトに配置した場合の計算モデルの模式図。

【図32】ホウ素原子を1個だけ炭素サイトに配置した場合の(110)面上のアクセプタの波動関数の2乗の等高線。

【符号の説明】

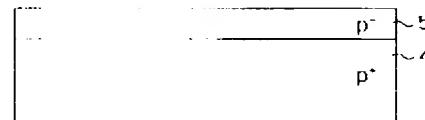
【図1】



【図3】



【図5】



【図7】



\* 1 … n' 型単結晶炭化珪素半導体基板、2 … n 型炭化珪素半導体層、3 … p 型炭化珪素半導体層、4 … p' 型単結晶炭化珪素半導体基板、5 … p- 型炭化珪素半導体層、6 … n 型炭化珪素半導体層、7 … p' 型単結晶炭化珪素半導体基板、8 … p 型炭化珪素半導体層、11 … n 型単結晶炭化珪素半導体基板、12 … n- 型炭化珪素半導体層、13 … p 型炭化珪素半導体層、14 … n' 型ソース領域、15 … 低抵抗 p 型炭化珪素領域、24 … p' 型単結晶炭化珪素半導体基板、25 … p- 型炭化珪素半導体層、26 … n 型炭化珪素半導体層、28 … p' 型ソース領域

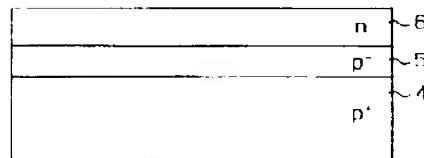
【図2】



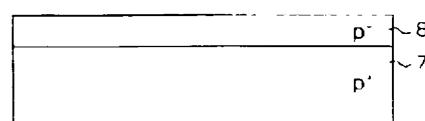
【図4】



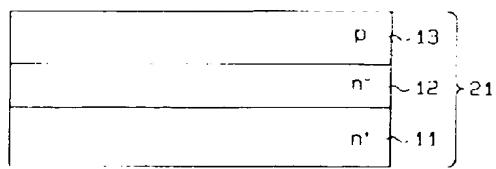
【図6】



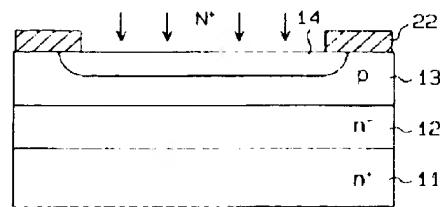
【図8】



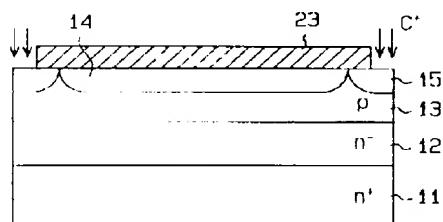
【図9】



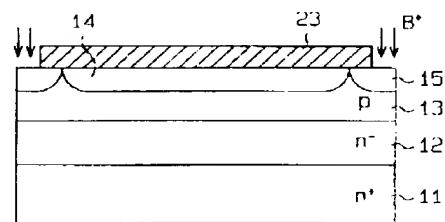
【図10】



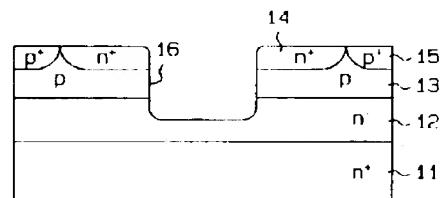
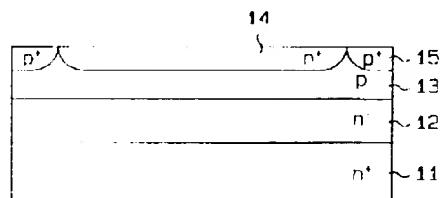
【図11】



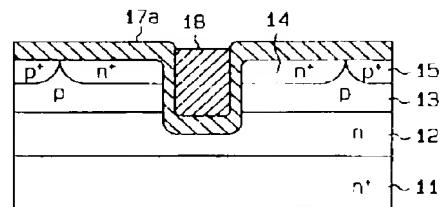
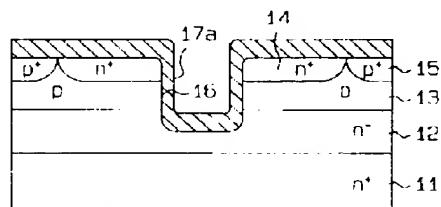
【図12】



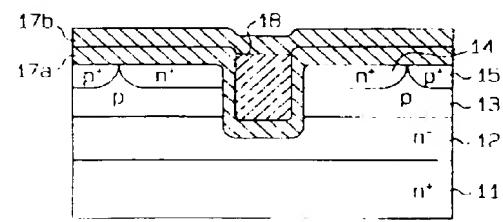
【図13】



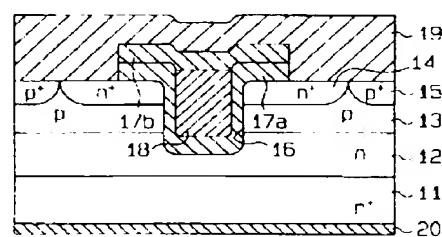
【図15】



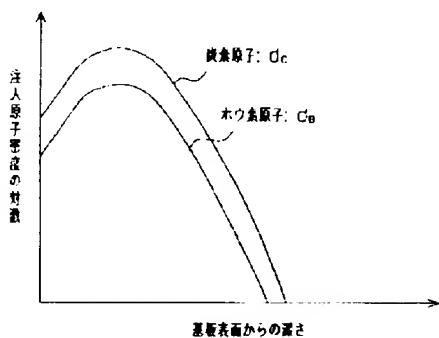
【図17】



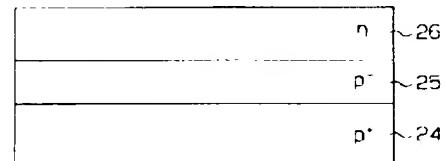
【図18】



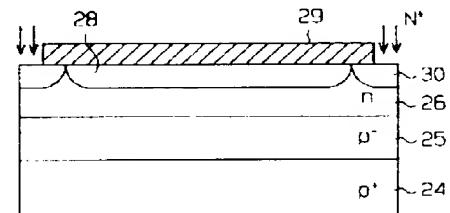
【図19】



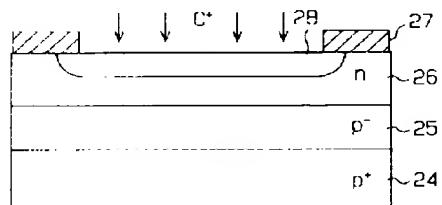
【図20】



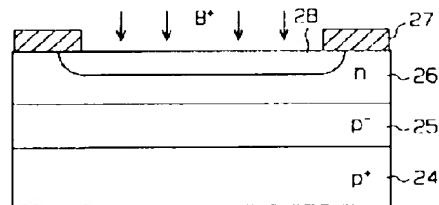
【図23】



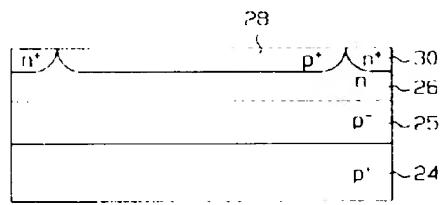
【図21】



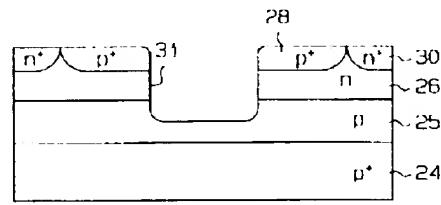
【図22】



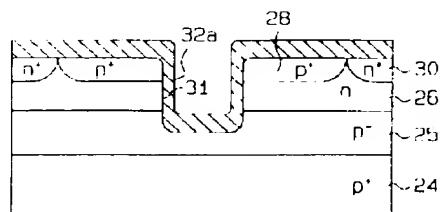
【図24】



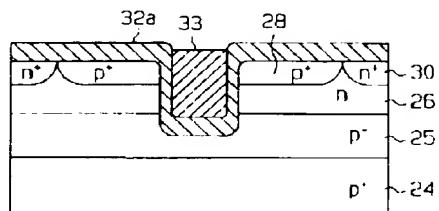
【図25】



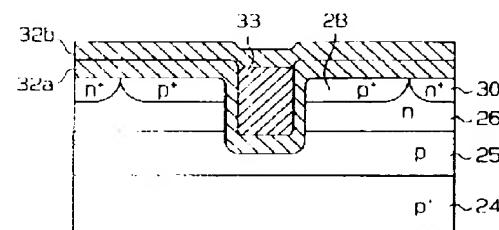
【図26】



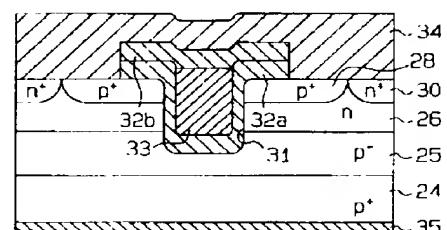
【図27】



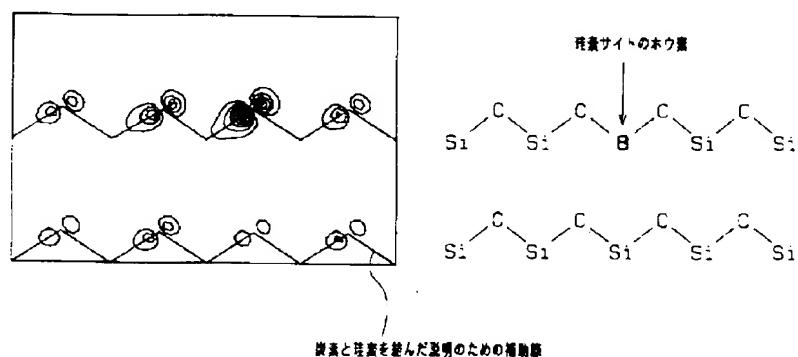
【図28】



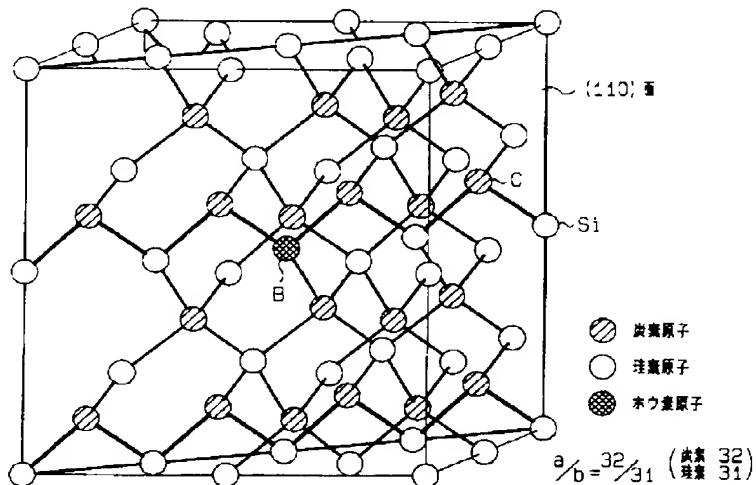
【図29】



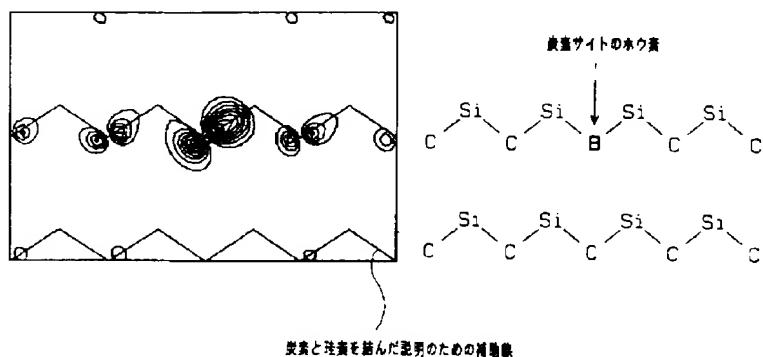
【図30】



【図31】



【図32】



フロントページの続き

(51)Int.CI.:

識別記号 序内整理番号  
9055-4MF I  
H01L 29/78

技術表示箇所

658A

(72)発明者 戸倉 規仁

愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 日本電  
気 株式会社内

(72)発明者 福本 敏勇

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内

(72)発明者 林 秀光

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内